第47卷　第4期
2024年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 4
Apr. 2024

黄河流域甘肃段生态敏感性评价研究
——以广河县为例

董晓媛，　胥德泽，　施小斌，　杜　森

（兰州交通大学建筑与城市规划学院，甘肃 兰州　730070）

摘　要：为探究适用于黄河流域甘肃段生态环境的保护理论与方法，解决该区域生态环境保护与社会经济发展的矛盾问题，选取适合黄河流域甘肃段生态敏感性评价因子，利用层次分析法和GIS空间分析方法，定量评价广河县生态敏感性，并选取GDP、人均GDP、人口密度等6项社会经济指标，结合耦合度模型和耦合协调度模型，分别探究生态敏感性与其的耦合协调关系。研究表明：(1) 水体、土壤可蚀性、植被覆盖与土地利用类型对广河县生态敏感性影响较强烈。(2) 生态敏感性子系统与各社会经济指标子系统呈现出较强的空间相关性，互相依存关系明显，耦合度水平均处于较高状态。(3) 耦合协调度研究中生态敏感性子系统与人均GDP、矿产资源指标子系统处于协调发展状态，生态敏感性子系统与GDP、人口密度、工业指标与养殖业指标子系统处于拮抗发展状态。研究生态敏感性与社会经济发展的相关性，为该区域提供差异化的发展与保护协调路径，并为同类型区域提供借鉴。

关 键 词：生态敏感性；GIS空间分析；耦合；黄河流域甘肃段

文章编号：1000－6060(2024)04－0599－13(0599～0611)

黄河流域及黄河所流经地区在国家发展中具有极为重要的战略地位[1]。黄河流域甘肃段是整个黄河流域重要的水源涵养区和生态补给区，承担着重要的生态服务功能，甘肃省的生态环境质量直接关系着黄河流域的生态安全[2]。黄河流域甘肃段生态保护问题刻不容缓[3]，良好的生态环境是流域社会、经济高质量发展的必要前提、必然要求和必达目标，特别对生态本底脆弱且经济发展欠发达的黄河流域甘肃段来说意义更为重大。

生态敏感性是衡量生态环境问题与生态系统之间是否失衡的重要指标，因此如何科学量化评价生态环境的敏感性是生态保护的前提。近年来，国内外学界对于生态敏感性的研究逐渐增加。在国外，学者对于生态敏感性评价研究方向主要集中在宏观尺度上的生态敏感性探究，例如气候变化、生态安全方面、土地利用变化及生态环境退化等内容。气候变化对于生态系统敏感性的探究包括森林管理对于气候变化的生态敏感性[4]，水碳平衡对于气候变化和变率的生态敏感性等[5]；生态安全方面的探究包括生态安全格局的构建[6-7]、生态绿色基础设施网络构建[8]、生态安全模式设计等[9]；土地利用变化方面的探究包括黄河流域生态脆弱性对土地利用的动态响应及内在联系[10]；生态环境退化的研究包括黄河流域生态环境退化区识别及退化强度评价，探究其内部的驱动因素[11]；此外，当前国内学者对于生态敏感性的研究方向由生态敏感性的单一因素研究转变为向多学科、多因子、多体系的综合研究，主要的方向为生态功能区划分、生态安全格局构建、土地利用优化等。例如采用多指标构建生态敏感性评价体系[12-15]；生态功能区划分方向主要包括生态功能区划研究[16]、生态功能评价及分区[17]、生态空间划分[18]等；生态安

收稿日期：2023-05-15；　**修订日期：**2023-06-29

基金项目：中国工程院战略研究与咨询项目(GS2022ZD102)；甘肃省科技计划资助项目(21CX6ZA072)；国家自然科学基金(51968037)资助

作者简介：董晓媛(1980-)，女，讲师，主要从事城市地理信息系统、国土空间规划等方面的研究. E-mail: dongxiaoyuan@mail.lzjtu.cn

通讯作者：杜森(1980-)，男，副教授，主要从事城乡规划与设计、国土空间规划等方面的研究. E-mail: dusen@mail.lzjtu.cn

全格局方向包括基于生态保护红线划分的生态安全格局构建[19-20]、生态安全格局识别[21-22]、流域生态安全格局的构建[23];土地利用优化方向包括土地利用空间格局优化配置[24]、旅游城市旅游用地策略研究[25]等。生态敏感性研究的尺度主要为大尺度的宏观分析,如国家[26-27]、省级[16,28-29]、市级[21,30-31]及流域[15,23,32]尺度。对于县级及以下尺度研究有待补充[33],对于国家的生态安全屏障且社会经济发展重要地带的黄河流域研究偏少。

本文以地处黄河流域上游的甘肃省临夏州广河县为例,结合广河县及黄河流域的自然地理条件、生态本底特征及生态基础数据,选取适合该区域生态敏感性8项评价因子,利用层次分析法和特尔菲法确定评价黄河流域甘肃段生态敏感性的各因子权重,同时基于多源数据与GIS空间分析方法,定量评价广河县生态敏感性,并选取GDP、人均GDP、人口密度、矿产资源、工业与养殖业共6项社会经济指标,分别探究生态敏感性与其的耦合协调关系,在空间上分析其耦合结果及原因,研究黄河流域甘肃段生态环境保护理论与方法,为该区域提供差异化的发展与保护协调路径,引导生态环境与社会经济发展向更为有序、协调的方向发展。

1 研究区概况

广河县地理位置介于103°20′~103°50′E,35°15′~35°38′N之间,甘肃省临夏回族自治州辖县,地处甘肃省中部西南、临夏回族自治州东南部,为黄土高原丘陵沟壑地带(图1)。其辖6镇3乡,总面积538 km²,海拔在1745~2577 m之间。境内地理特征可概括为"一川两山、一路两河",即中部广通河沿线为川区,南北为山地[34]。广河县境内主要的河流有广通河、洮河,都同属于黄河的支流,自西向东穿越广河县北部的广通河与东侧自北向南流经的洮河在广河县东北部汇集。广河县是以农牧产品深加工为主导产业,具有浓郁民族特征的城镇,农业主导产业为养殖业,境内砂石、黏土矿产资源分布较广,境内生态环境脆弱。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

由于生态敏感性评价需要多个因子进行综合分析,本文选择的多源数据即数字高程模型数据来自NASA地球科学数据网站,利用该数字高程模型进行表面分析及水文分析得到广河县坡向、坡度及

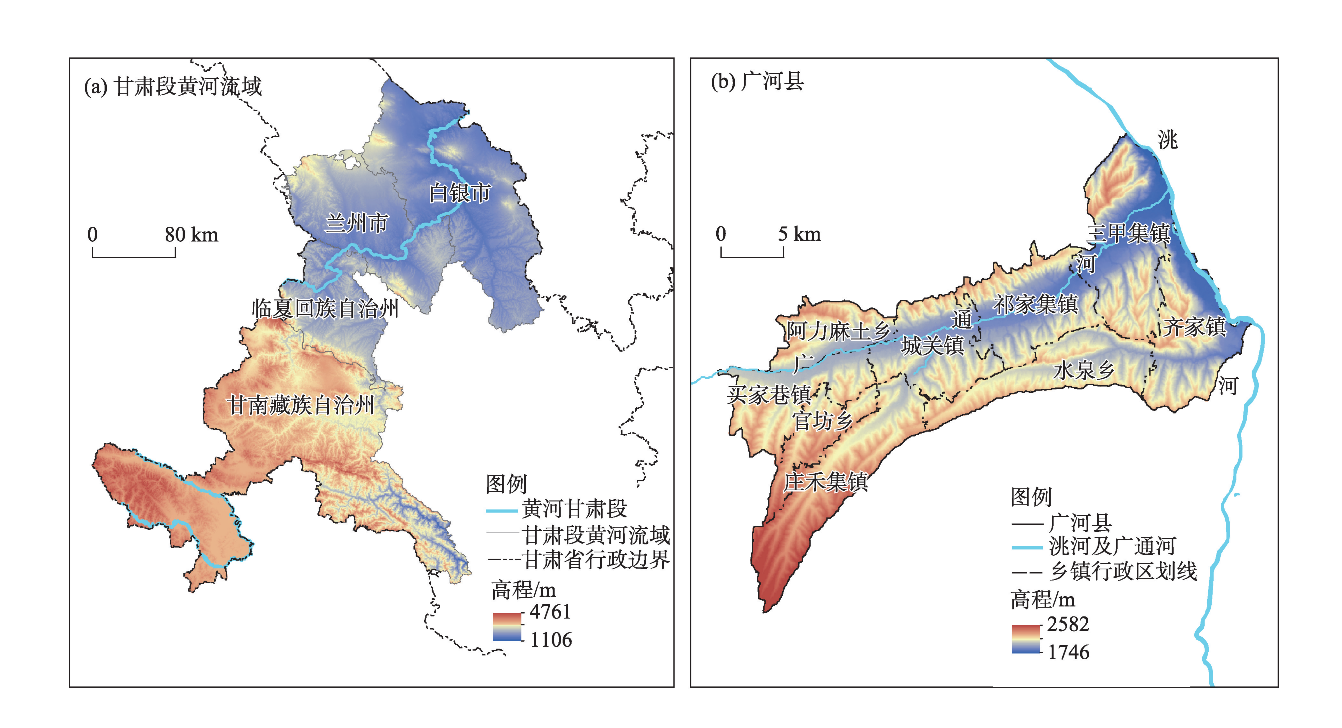


图1 研究示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

广河县内河流分布图；植被覆盖度因子以归一化植被指数(NDVI)进行量化表示，其通过地理空间数据云Landsat8OLI_TIRS卫星数字产品数据集，选取其2020年且云量不超过20%的数据，利用ENVI 5.2软件进行处理后获取；土壤可蚀性因子通过国家青藏高原科学数据中心的世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(v1.2)，通过张科利等[35]土壤可蚀性因子的估算公式计算得到；利用美国国家海洋和大气管理局下设的国家环境信息中心获取长时间序列的气象数据，选取1992—2022年的气象站点数据，通过空间插值及计算获取降雨侵蚀力因子[36]；土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心的中国多时期土地利用遥感监测数据集，选取其2020年土地利用遥感监测数据；GDP数据来源于Zhao等[37]学者的研究成果；人口密度来源于LandScan人口数据集；矿产资源分布数据、工业与养殖业用地数据来源于广河县矿产资源管理部门、工信部门及农业部门，且社会经济指标数据年份均为2020年。

以上数据均在ArcGIS 10.8中进行数据的预处理，所有因子均采用栅格数据方式进行表达，其像元值为12.5 m×12.5 m，最终统一在UTM投影坐标系下。

2.2 研究方法

2.2.1 构建评价指标体系 广河县地处典型的黄土高原半干旱生态脆弱区，区域内丘陵密布、沟壑纵横，由于地处黄河上游区域，其对下游承担了重要的生态保护功能。其气候条件、自然条件及人类活动轨迹与其他区域不同，呈现出多样性类型特征。因此，在构建评价指标体系时，生态敏感因子的选取尤为重要，本文通过分析生态本底特征结合众多学者的研究成果，选取地形条件、自然环境、人类活动3个为一级指标，其中地形条件包含海拔、坡度、坡向3个因子；自然环境包含水体、植被覆盖、土壤可蚀性、降雨侵蚀力4个因子；人类对土地开发利用是最直接影响生态环境的途径，因此人类活动指标选取土地利用类型因子。由于广河县农业主导产业为养殖业，占总农业产值的43.87%；境内砂石、黏土资源分布较广，是目前全县开发前景较好的矿产，工业处在快速发展时期。鉴于此，选取GDP、人均GDP、人口密度、矿产资源、工业与养殖业共6项社会经济指标。

本文通过分析广河县生态本底特征，结合自然间断点分级方法构建了广河县生态敏感性评价指标体系，将单因子的敏感性分为5个等级，依次为高、较高、一般、较低与低并赋值为9、7、5、3、1，结果见表1。

2.2.2 确立评价因子权重 因广河县独特的地理位置，评价因子的权重需要根据实际情况调整，本文采用层次分析法，将所有因子进行两两比较打分并计算权重，为了避免相关不合理数据出现，构造判断矩阵对数据进行检验：$CR = CI/RI$，$CR<0.1$。相关步骤如下：

(1) 构建生态敏感性层次评价模型。

(2) 利用一致矩阵法对各因子进行两两比较确定各个要素的相对重要性，并结合特尔菲法对各因子进行权重确定。即综合了城市生态学、土地资源管理、资源环境与人文地理、经济学、城乡规划、测绘科学、地理信息科学的7位专家就单因子对生态环境影响的两两重要性进行比较和分析判断，最后构造判断矩阵且满足以下要求：

$$a_{ij} > 0、a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}和a_{ii} = 1 \quad (1)$$

表1 广河县生态敏感性评价指标体系

Tab. 1 Ecological sensitivity evaluation index system of Guanghe County

	评价指标	低敏感	较低敏感	一般敏感	较高敏感	高敏感
地形条件	海拔/m	<1914	1914~2047	2047~2165	2165~2311	>2311
	坡度/(°)	<7.8	7.8~15.5	15.5~23.2	23.2~33.3	>33.3
	坡向	平地、正南	东南、西南	正东、正西	东北、西北	正北
自然环境	水体/m	<50	50~200	200~500	500~1000	>1000
	植被覆盖	>0.49	0.42~0.49	0.34~0.42	0.26~0.34	<0.26
	土壤可蚀性	<0.039	0.039~0.041	0.041~0.043	0.043~0.045	>0.045
	降雨侵蚀力	<1344	1344~1447	1447~1546	1546~1690	>1690
人类活动	土地利用类型	水域	林地	草地	耕地	建设用地、未利用土地

式中：a_{ij} 和 a_{ji} 为两两因子之间比较结果；a_{ii} 为相同因子重要性等于1。

（3）采用层次单排序与一致性检验来判断所确定的权重值与客观实际接近情况。将所有因子展开层次排序，而后进行计算最大特征根（λ_{max}）、偏离性指标（CI）、随机性一致性指标（RI）、一致性检验指标（CR）。

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (2)$$

$$CI = (\lambda - n)(n - 1) \quad (3)$$

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

式中：n 为唯一非零特征根；A 为判断矩阵；W 为特征向量；W_i 为特征向量的分量。通过计算求得 λ_{max} = 8.41，CI=0.046，RI=1.12，CR=0.041；因 CR=0.041<0.1，即符合检验，各生态敏感性因子对比矩阵及权重见表2。

2.2.3 GIS空间分析方法 将上述各指标因子在ArcGIS 10.8首先进行分级，即分为高敏感、较高敏感、一般敏感、较低敏感与低敏感；而后将所有因子加权叠加得到综合生态敏感性评价结果，其计算公式为：

$$W = \sum_{i=1}^{n} P_i X_i \quad (5)$$

式中：W 为生态敏感性指数；n 为评价因子数量；P_i 为第 i 个因子的权重；X_i 为第 i 个因子的评价分值。

2.2.4 标准值化与综合评价模型 在本文中，将生态敏感性子系统标准值进行取反（即生态敏感性高、较高、一般、较低及低，分别赋值1、3、5、7、9，后续生态敏感性中值均为取反后计算，以下简称“生态敏感性系统”），随后将各项社会经济发展指标子系统的值标准化，最后利用多因素综合评价模型分别计算其发展指数，公式如下：

$$W = \sum_{i=1}^{n} S_i \times V_i \quad (6)$$

式中：W 为生态敏感性子系统或者社会经济发展指标子系统的综合发展指数；S_i 为单个指标相对于生态敏感性子系统或社会经济指标6个子系统的权重（在ArcGIS中指其占地面积）；V_i 为单个指标的标准化分值。

2.2.5 耦合度模型 耦合是指2个或2个以上体系或运动形式之间通过交互作用而互相影响的现象[38]。生态环境系统和社会经济系统的耦合关系是指两系统之间、系统内各要素之间相互胁迫、相互依存关系的客观表征[38-39]。在此研究中，研究生态敏感性与6个经济社会指标的相关性，耦合度的计算公式为：

$$C = 2 \times \left[\frac{W_1 \times W_2}{(W_1 + W_2)^2} \right]^2 \quad (7)$$

式中：C 为耦合度，$C \in [0, 1]$，C 越大表示2个相关系统之间的耦合度越高，联系越紧密。W_1、W_2 分别为生态敏感性发展指数和社会经济发展指数。

2.2.6 耦合协调度模型 耦合度模型反映系统之间相互联系的紧密程度，但不能反映系统相互作用的水平和方向[40]。故本文引入耦合协调度模型，在计算耦合度的基础上计算其耦合协调度，反映生态敏感性与社会经济指标的耦合协调水平，计算公式为：

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (8)$$

$$T = \alpha W_1 \times \beta W_2 \quad (9)$$

式中：C 为上文已经计算过的耦合度；T 为子系统的协调指数；其中需满足 $\alpha + \beta = 1$，α、β 指数反应

表2 指标因子对比矩阵及权重

Tab. 2 Comparison matrix and weights of indicator factors

指标	海拔	坡度	坡向	水体	植被覆盖	土壤可蚀性	降雨侵蚀力	土地利用类型	权重	权重排序
海拔	1	3	5	1/3	1/4	1/3	1/3	1/5	0.066	6
坡度	1/3	1	3	1/5	1/5	1/3	1/3	1/5	0.042	7
坡向	1/5	1/3	1	1/5	1/7	1/5	1/5	1/9	0.024	8
水体	3	5	5	1	1/2	1	1	1/3	0.132	5
植被覆盖	4	5	7	2	1	1	3	1	0.218	2
土壤可蚀性	3	3	5	1	1	1	1	1	0.156	3
降雨侵蚀力	3	3	5	1	1/3	1	1	1/3	0.117	4
土地利用类型	5	5	9	3	1	1	3	1	0.245	1

其2个系统间的重要程度，本文认为生态敏感性与社会经济互相作用、地位同等，故取 $\alpha=\beta=0.5$ 。D 为耦合协调度，$D\in[0, 1]$，耦合协调度的大小可以判断系统的耦合协调关系，随着 D 的增大，系统间的耦合协调程度就越高，反之系统耦合协调程度就越低。

3　结果与分析

3.1　单因子生态敏感性分析

广河县生态敏感性各项因子评价数据详见表3。

3.1.1　海拔敏感性分析　广河县地形以沟壑丘陵为主，地势自西南向东北倾斜，区域内最高海拔2582 m，最低海拔1746 m。通过图2a可知，面积占比最大的是一般敏感区，占地面积约158.07 km^2，占总面积的29.36%；其次为低敏感区，占地面积约133.90 km^2，占总面积的24.88%；然后是较高敏感区和低敏感区，面积分别是122.91 km^{2}和83.71 km^2，分别占总面积的22.83%和15.55%，面积占比最少的是高敏感区，面积为39.75 km^2，占总面积的7.38%，因此其海拔敏感性主要表现为一般敏感性，主要分布于广河县南北两侧山区内。

3.1.2　坡度敏感性分析　坡度对自然环境影响体现在地表径流速率、土壤含水量等方面，坡度越大造成的影响越大，敏感性也越高[41]。坡度因子生态敏感性评价结果如图2b所示，广河县坡度落差较大，区域内最高坡度76°，最低坡度0，沿着河流坡度普遍较低，其中敏感性一般及以上区域占总区域46.71%，共248.77 km^2，基本全部分布在广河县南北两侧山区内，其区域容易诱发水土流失等问题。

3.1.3　坡向敏感性分析　坡向直接影响光照条件从而影响了植被的生长，其中正南为最好，正北为最差。广河县坡向敏感性因子评价如图2c所示，其中一般敏感（正东、正西）及较高敏感（东北、西北）区域占总区域的58.33%，共312.91 km^2，这些区域在山体区域尤为明显，高敏感（正北）区域占总区域的12.94%，共69.40 km^2，基本均匀分布在广河县区域内，广通河以南高敏感区域具有较明显的空间聚集特征。

3.1.4　水体敏感性分析　地表水域在改善区域景观质量，调节区域温度与湿度，维持正常水循环等方面发挥着重要作用[42]。广河县内以黄河支流广通河为主，如图2d所示，其中一般敏感及以上敏感性区域占总区域84.93%，共455.56 km^2，广河县水体敏感性主体来说处于较高阶段，其集聚分布在广河县山区内。

3.1.5　植被覆盖敏感性分析　由表3及图2e可知，广河县内除去城镇建成区后，植被覆盖由西南到东北逐渐下降，广河县域内大多数区域NDVI值分布在0.26~0.42之间，其对应的生态敏感性为一般敏感和较高敏感，其总占比为82.25%，共441.22 km^2，广河县内植被较稀少，植被覆盖敏感性总体较高，且表现出“由西南到东北逐渐升高”的分布特征。

3.1.6　土壤可蚀性敏感性分析　土壤敏感程度由土壤可蚀性因子来量化，土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标，也是进行土壤侵蚀预报的重要参数，通过张科利等[35]的土壤可蚀性 K 值的估算公式计算广河县土壤可蚀性因子。而后，通过自然间断点法进行分级，结果如图2f所示，其中一般敏感及以上敏感性区域占总区域77.07%，共

表3　单因子生态敏感性评价数据

Tab. 3　Single-factor ecological sensitivity evaluation data

指标	低敏感		较低敏感		一般敏感		较高敏感		高敏感	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
海拔	83.71	15.55	133.90	24.87	158.07	29.36	122.91	22.83	39.75	7.38
坡度	136.21	25.30	151.43	28.13	143.40	26.64	79.14	14.70	26.24	4.87
坡向	49.73	9.27	104.37	19.46	159.70	29.77	153.21	28.56	69.40	12.94
水体	33.73	6.29	49.04	9.14	111.16	20.72	142.88	26.64	201.52	37.57
植被覆盖	4.43	0.83	65.68	12.25	202.61	37.77	238.62	44.48	27.00	5.03
土壤可蚀性	0.05	0.01	124.88	23.28	139.62	26.03	157.06	29.28	116.72	21.76
降雨侵蚀力	66.17	12.34	131.69	24.55	140.04	26.11	105.27	19.62	95.17	17.74
土地利用类型	11.75	2.19	11.46	2.14	322.75	60.17	166.72	31.08	25.66	4.78

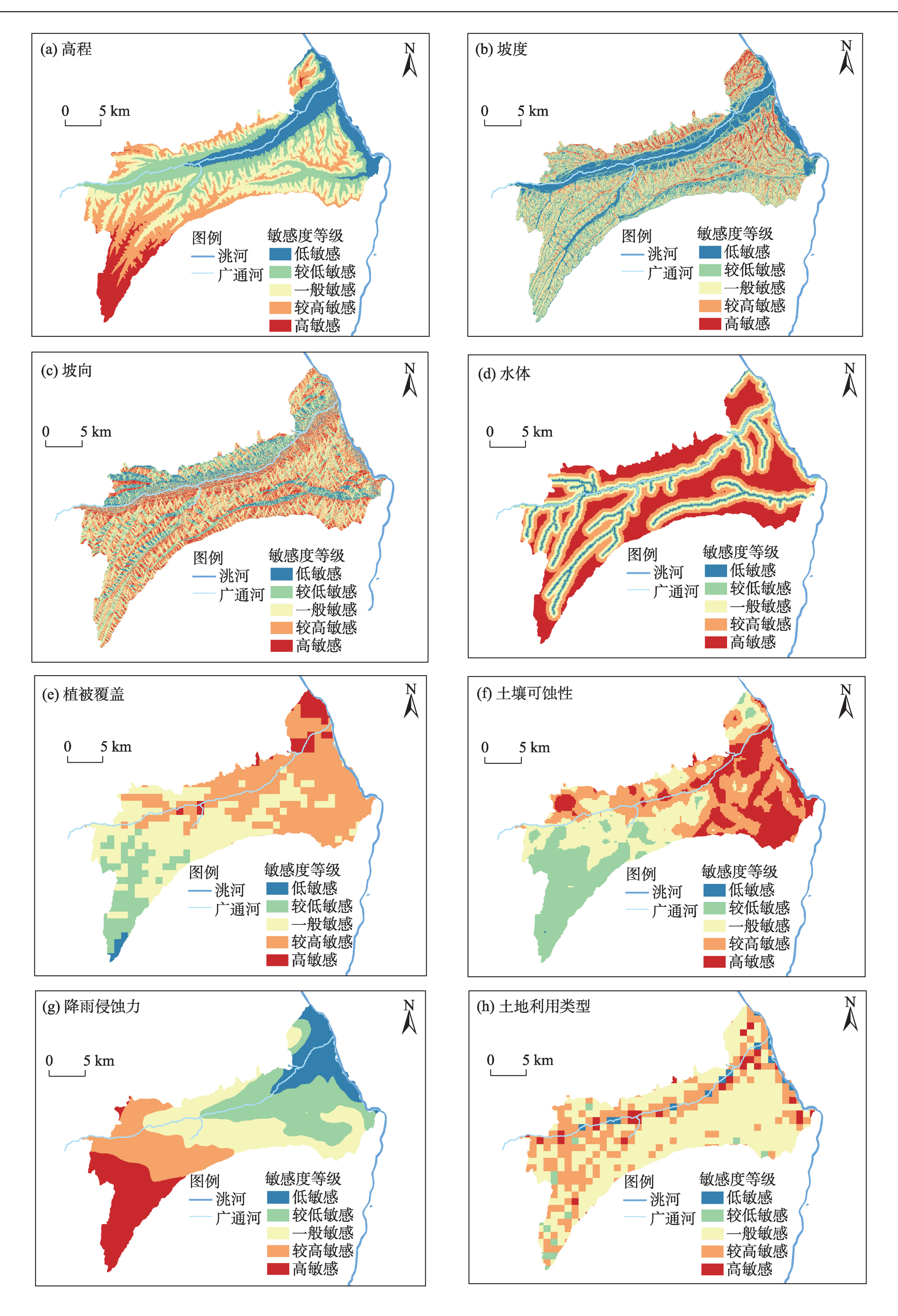


图2 各评价因子敏感性集合

Fig. 2 Sensitivity set of each evaluation factor

413.39 km²,主要分布在广河县域中部及东北部区域。

3.1.7 降雨侵蚀力敏感性分析 降雨是土壤发生侵蚀的主要动力,对降雨侵蚀力进行敏感性评价可反映降雨对土壤侵蚀的影响状况[43]。利用甘肃各站点气象数据,通过空间插值及计算获取降雨侵蚀力因子,分级结果如图2g所示,其中一般敏感及以上敏感性区域占总区域63.47%,共340.48 km²,主要分布在广河县内中部地区及西南部地区,且表现出“由东北到西南逐渐升高”的分布特征。

3.1.8 土地利用类型敏感性分析 本文通过使用频率及干扰程度将不同的土地利用类型分别分级为低、较低、一般、较高及高5级,结果如图2h所示,其中一般敏感及以上敏感性区域占总区域96.03%,共515.13 km²,大面积分布在广河县域内东南部,广河县域内其他地方也有均匀分布。广河县内一般敏感性区域占总区域60.17%,其土地利用类型敏感性主要表现为一般敏感性,主要分布在广河县南北山区内。

3.2 综合生态敏感性分析

通过加权叠加各个因子生态敏感性得到广河县综合生态敏感性结果,具体结果如图3、表4,其中一般敏感及以上敏感性区域占总区域88.52%,共474.85 km²,而一般敏感性及以下敏感性区域占总区域68.98%,共370.05 km²。

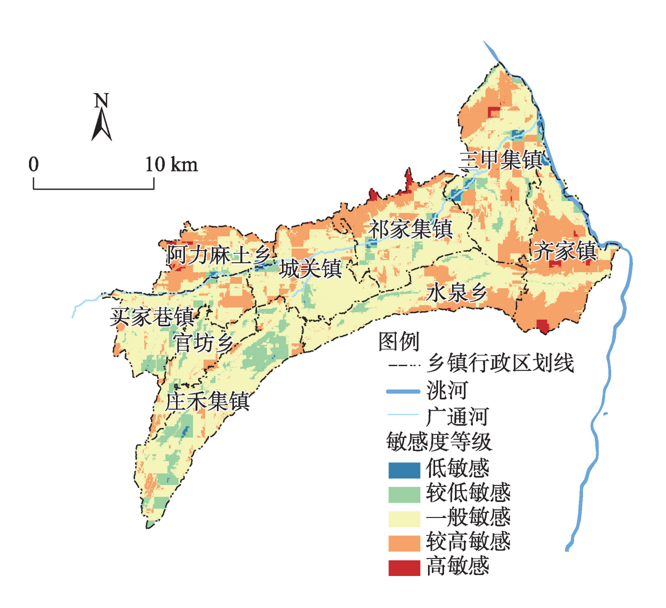


图3　综合生态敏感性分析

Fig. 3　Comprehensive ecological sensitivity analysis

从空间分布上来看,生态敏感性高的区域基本散布在广河县北部山区及广河县东南部山区齐家镇内,在这些区域内土壤可蚀性、土地利用类型及水体表现为高生态敏感,同时植被覆盖及高程表现为较高生态敏感,区域生态敏感性高的原因主要是因为远离河流且该地区土壤质地容易遭到侵蚀。生态敏感性较高的区域在广河县北部山区均匀分布、广河县东南部山区齐家镇及水泉乡内大面积分布、广河县中部地区主要集中在买家巷镇、城关镇及祁家集镇,在这些区域内土壤可蚀性、水体表现出高生态敏感,同时植被覆盖表现出较高生态敏感,土地利用类型表现出一般生态敏感,综上所述,区域生态敏感性高的原因主要是因为远离河流且该地区土壤质地容易遭到侵蚀,同时植被覆盖不高。

3.3 生态敏感性与社会经济的相关性

3.3.1 耦合度结果分析 耦合度即C值,代表了耦合相关性是否紧密。本文中C=0.00时,其系统耦合度最小,即生态敏感性与社会经济发展的相关性基本为0,空间分布上呈现无序状态。考虑到西北地区的生态敏感性与社会经济发展的关系,本文中耦合度的分级标准采用同为西北地区黄土高原生态脆弱带的陕西安塞县的分级标准[44]。即$C\in[0.00, 0.35)$生态敏感性与社会经济发展的相关性为弱耦合,$C\in[0.35, 0.65)$生态敏感性与社会经济发展的相关性为中度耦合,$C\in[0.65, 0.85)$生态敏感性与社会经济发展的相关性为较强耦合,$C\in[0.85, 1.00)$生态敏感性与社会经济发展的相关性为强耦合,C=1.00生态敏感性与社会经济发展的相关性为极强耦合。经过计算与分级,6组耦合关系结果见图4。

由图4可知,生态敏感性与6组社会经济指标耦合关系都处于较强耦合关系及以上,两者呈现出较强空间相关性;生态敏感性与GDP极强耦合及强

表4　综合生态敏感性分析

Tab. 4　Comprehensive ecological sensitivity analysis

指标	低敏感		较低敏感		一般敏感		较高敏感		高敏感	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
综合生态敏感性指数	6.41	1.19	55.14	10.28	308.50	57.51	159.01	29.64	7.34	1.37

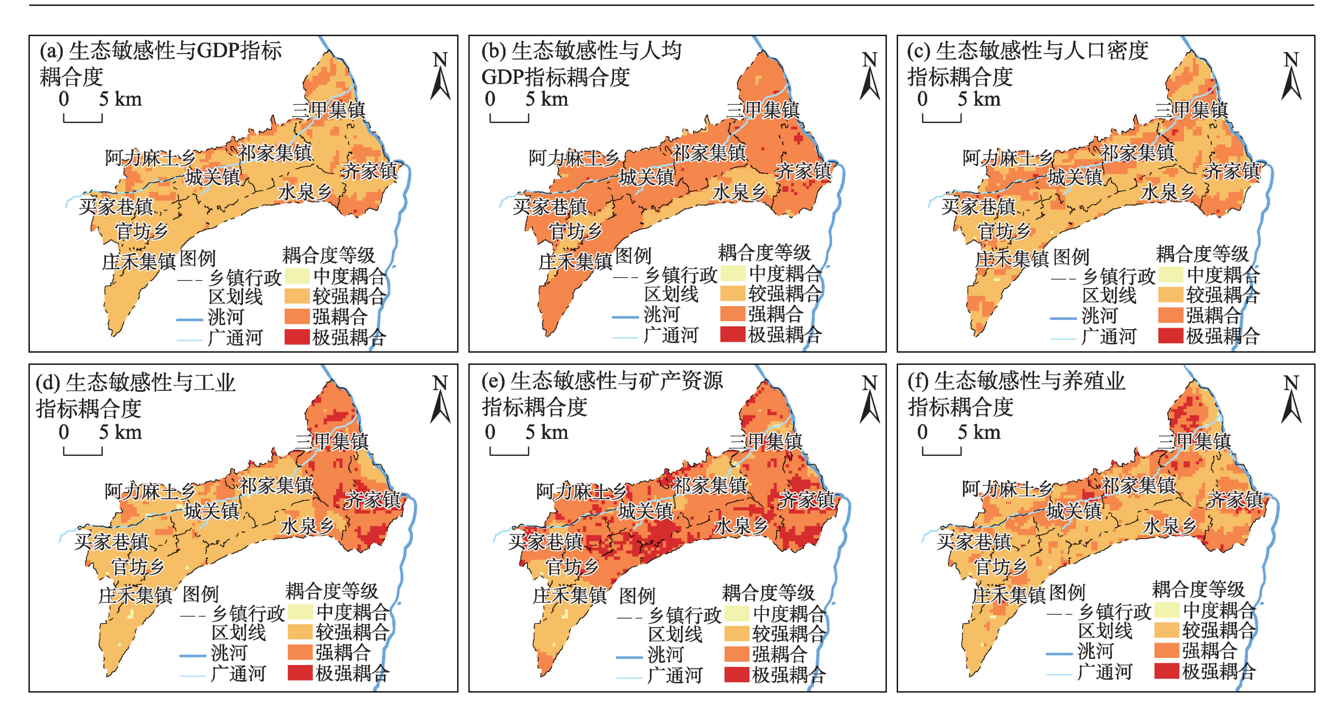


图4 生态敏感性与社会经济指标耦合度

Fig. 4 Coupling degree between ecological sensitivity and socio-economic indicators

耦合区域分布在广河县北部及东南部，在空间上表现为“东高西低、北高南低”的分布特征；生态敏感性与人均GDP指标较强耦合区域集中分布在官坊乡与水泉乡内，其空间分布差异明显；生态敏感性与人口密度指标强耦合区域主要分布在沿河地带及东南部，在空间上表现为“沿广通河突出、中部塌陷”的分布特征；生态敏感性与工业指标极强耦合及强耦合区域集中分布在齐家镇及三甲集镇内，空间上表现为“从西南到东北逐渐升高”的分布特征，其空间分布差异明显；生态敏感性与矿产资源指标极强耦合区域主要分布在城关镇及齐家镇内，在空间上表现为“西南与东北塌陷、中部突出”的分布特征；生态敏感性与养殖业指标极强耦合及强耦合区域主要分布与广河县北部及东南部内，空间上表现为“东高西低、北高南低”的分布特征。

3.3.2 耦合协调度结果分析 耦合协调的类型，其对应生态敏感性与社会经济指标耦合协调的发展状态，因此构建其分级体系及对应关系十分重要。结合相关文献进行参考[44-45]，构建广河县生态敏感性与社会经济指标耦合协调类型及发展状态对应关系（表5）。计算其6组耦合协调度，按照表5进行分级，具体结果见图5。

由图5可知，生态敏感性与6组社会经济指标耦合协调度与其耦合度的空间分布具有一定关联性，耦合协调度的高值区与耦合度的高值区大致吻合。生态敏感性与GDP指标中高度耦合协调区域主要分布在广通河两侧，在空间上表现为“广通河沿线高、南北部低”的分布特征，原因为广通河沿线产业发展态势较好，但大面积表现为低耦合协调，两者表现拮抗发展状态；生态敏感性与人均GDP指标高度耦合协调区域占比较大，在空间上表现为“北高南低”的分布特征，原因为广河县中心城镇与主导产业发展与生态敏感性达到共振耦合状态，两者表现为协同发展状态；生态敏感性与人口密度指标中高度耦合协调区域在空间上表现为“沿广通河两侧带状集中”的分布特征，原因为人口在广通河沿线具有较明显的空间集聚特征且发展态势较好，两者表现拮抗发展状态；生态敏感性与工业指标中高度耦合协调区域占比较低，且集中分布在齐家镇及三甲集镇内，在空间上表现为“从西南到东北逐渐升高”的分布特征，其原因为广河经济开发区位于三甲集镇及齐家镇内，工业产业集聚效应凸显，但大面积表现为低耦合协调，两者表现拮抗发展状态；生态敏感性与矿产资源指标中高度耦合度协调度区域占比较高，在空间上表现为“东西部塌陷、中部突出”的分布特征，原因为矿产资源开发利用区域分布在广河县中部，两者表现协同发展状态；生态敏感性与养殖业指标中高度耦合协调区域占比

表5 广河县生态敏感性与社会经济指标耦合协调类型及发展状态

Tab. 5 Types and development status of coupling coordination between ecological sensitivity and socio-economic indicators in Guanghe County

耦合协调度分级	类型	耦合协调发展状态	耦合协调度分级	类型	耦合协调发展状态
$0.0 \leqslant D < 0.5$	失调	严重拮抗	$0.7 \leqslant D < 0.85$	中度耦合协调	磨合
$0.5 \leqslant D < 0.7$	低耦合协调	拮抗	$0.85 \leqslant D \leqslant 1.0$	高度耦合协调	协调

注：D为耦合协调度。

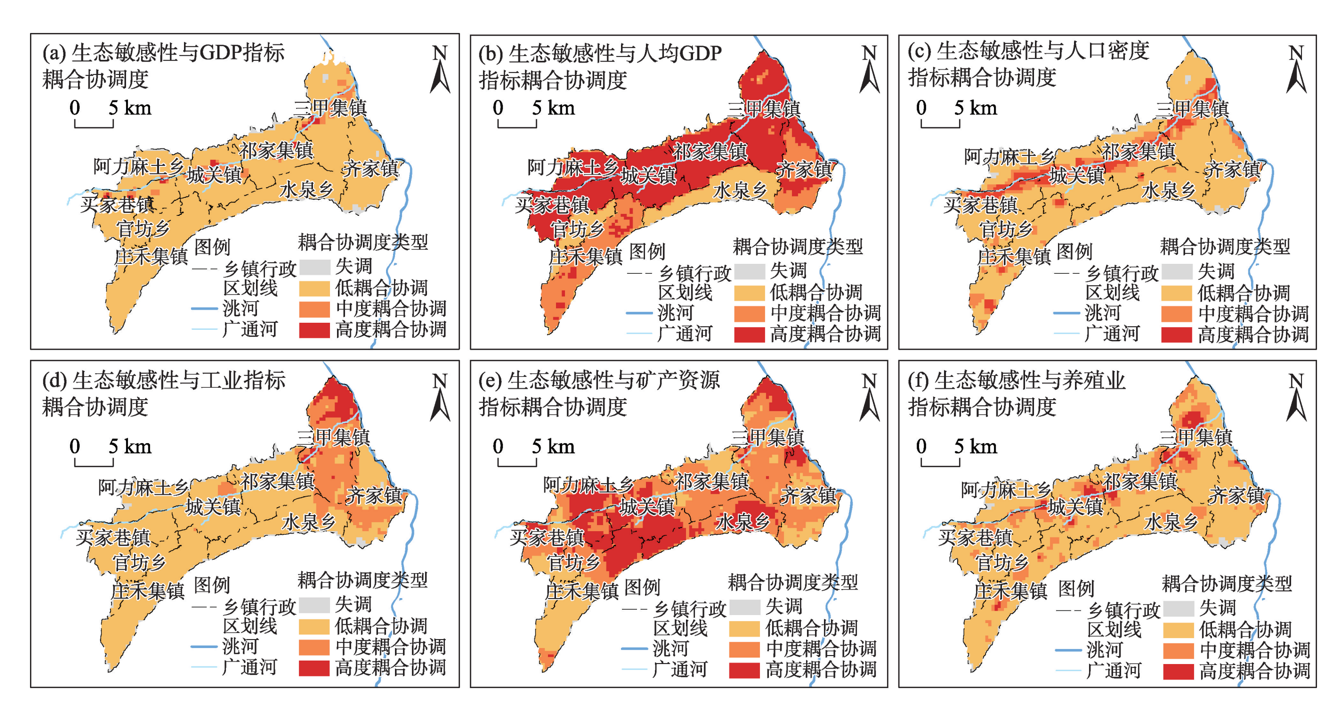


图5 生态敏感性与社会经济指标耦合协调度

Fig. 5 Coupling coordination degree between ecological sensitivity and socio-economic indicators

较低，在空间上表现为"各乡镇行政中心处集中"的分布特征，高值区逐渐向外扩散，形成较为分散的局部耦合协调中心，其原因为畜牧养殖区域集中分布在各乡镇行政中心处，两者表现拮抗发展状态。

4 结论与建议

4.1 结论

生态环境是一个复杂的自然巨系统，作为评价生态敏感性的指标之一，其生态敏感性评价的体系构建十分复杂且多样。本文在定量评价广河县的生态敏感性的基础上，进一步探究生态敏感性与社会经济指标的耦合协调关系，且通过结合广河县的实际情况，研究得出以下结论：

（1）广河县引起生态敏感性高或者较高的原因为以下几点：远离河流，土地较为干旱且生物多样性较差；土壤可蚀性较高，土壤质地易被侵蚀；植被覆盖度较低，生态系统韧性较弱；土地利用类型为耕地、建设用地或未利用地，生态系统脆弱且生态敏感性较高。

（2）在生态敏感性子系统与各社会经济指标子系统的耦合度中，6组关系耦合度水平都处于较高状态，即生态敏感性子系统与各社会经济指标子系统呈现出较强的空间相关性，互相依存关系较为明显，说明生态敏感性子系统与社会经济指标子系统紧密联系、互相影响。

（3）广河县生态敏感性子系统与各社会经济指标子系统的耦合协调度中，生态敏感性子系统与人均GDP、矿产资源指标子系统处于协调发展状态，即表现出差异化发展形态，在空间分布表现为随着生态敏感性的降低，大部分区域的社会经济指标的水平提高；而生态敏感性子系统与GDP、人口密度、工业与养殖业指标子系统处于拮抗发展状态，即表现出协同发展形态，在空间上表现为随着生态敏感

性的提高,大部分区域的社会经济指标的水平提高。而与生态敏感性子系统表现出协同发展形态的社会经济指标子系统正是导致了广河县生态敏感性与经济发展在空间上集聚分布的原因,也是生态敏感性子系统和社会经济指标子系统之间存在发展矛盾的原因,这4项指标为不利于广河县可持续发展与生态环境保护的主要因素。

4.2 建议

生态敏感性子系统与社会经济指标各子系统的耦合度水平都处于较高状态,说明生态敏感性与社会经济联系紧密,二者的相关性较高。但在耦合协调度水平中,矿产资源、人均GDP与其他社会经济指标子系统呈现出差异化特征,应给予差异化的发展保护策略,引导生态环境与社会经济发展向更为有序、协调的方向发展。

(1) 协调发展状态:在耦合协调度高、较高区域优先布局各类产业空间,同时进一步结合生态敏感性分析结果进行矫正,得出优先发展区域。如在矿产资源开发时,针对评价结果显示的庄禾集镇、三甲集镇、官坊乡等耦合协调度高的区域,设立矿产资源集中开发区以备选开发区。

(2) 拮抗发展状态:结合生态敏感性分析结果在耦合协调度低、失调区域发展生态经济,例如可依托祁家集镇、三甲集镇现有产业集群特征,发展农产品深加工,同时进一步优化产业结构,引导高污染工业企业转型;引导皮革毛纺产业进行工艺改进,减少"三废"排放;齐家镇、买家巷镇发展特色养殖产业,需注意"精细式"放牧,不可对生态环境造成破坏,且加大生态保育工程的力度。

4.3 研究不足

在研究生态敏感性子系统与各社会经济指标子系统的耦合关系中,精确到了以栅格为统计单位的评估单元,但是缺少长时间序列的社会经济指标,进行长时间序列的生态敏感性与社会经济指标的耦合度以耦合协调度的分析,可深入探究生态敏感性-社会经济指标内在的时序动态演变关系。

参考文献(References)

[1] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436. [Lu Dadao, Sun Dongqi. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431-2436.]

[2] 赵诚诚, 潘竟虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 6973-6984. [Zhao Chengcheng, Pan Jinghu. Ecological safety pattern identification and optimization based on the ecologicalsupply and demand in Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6973-6984.]

[3] 李元征, 冯智志, 李立, 等. 基于GIS的黄河流域陆地生态系统生态敏感性评价[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(4): 219-225. [Li Yuanzheng, Feng Zhizhi, Li Li, et al. Assessment of ecological sensitivity of terrestrial ecosystem in the Yellow River Basin based on GIS[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(4): 219-225.]

[4] Seidl R, Aggestam F, Rammer W, et al. The sensitivity of current and future forest managers to climate-induced changes in ecological processes[J]. Ambio, 2015, 45: 430-441.

[5] Raupach M, Haverd V, Briggs P. Sensitivities of the Australian terrestrial water and carbon balances to climate change and variability[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182-183: 277-291.

[6] Jin X, Wei L, Wang Y, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: A case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China[J]. Environment Development and Sustainability, 2020, 23: 563-590.

[7] Chen J, Wang S, Zou Y. Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108688, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108688.

[8] Hu X, Ma C, Huang P, et al. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection? A case of Weifang City, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107464, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107464.

[9] Su X, Zhou Y, Li Q, Designing ecological security patterns based on the framework of ecological quality and ecological sensitivity: A case study of Jianghan Plain, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(8383): 1-31.

[10] Zhang Q, Wang G, Yuan R, et al. Dynamic responses of ecological vulnerability to land cover shifts over the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109554, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109554.

[11] Li T, Zhang Q, Singh V P, et al. Identification of degradation areas of ecological environment and degradation intensity assessment in the Yellow River Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 1-14.

[12] 张恩伟, 彭双云, 冯华梅. 基于GIS和RUSLE的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 115-122. [Zhang Enwei, Peng Shuangyun, Feng Huamei. Sen-

sitivity assessment of soil erosion and its spatial pattern evolution in Dianchi Lake Basin based on GIS and RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 115-122.]

[13] 杨志峰, 徐俏, 何孟常, 等. 城市生态敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2002(4): 73-77. [Yang Zhifeng, Xu Qiao, He Mengchang, et al. Analysis of city ecosensitivity[J]. China Environmental Science, 2002(4): 73-77.]

[14] 吴金华, 李纪伟, 朱鸿儒. 基于ArcGIS区统计的延安市土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1180-1188. [Wu Jinhua, Li Jiwei, Zhu Hongru. Land ecological sensitivity evaluation of Yan'an based on zonal statistics of ArcGIS[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(7): 1180-1188.]

[15] 刘海龙, 王炜桥, 王跃飞, 等. 汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3952-3964. [Liu Hailong, Wang Weiqiao, Wang Yuefei, et al. Comprehensive evaluation of ecological sensitivity and the characteristics of spatiotemporal variations in the Fenhe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3952-3964.]

[16] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 安徽省生态功能区划研究[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 254-260. [Jia Liangqing, Ouyang Zhiyun, Zhao Tongqian, et al. The ecological function regionalization of Anhui Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 254-260.]

[17] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 白洋淀湿地生态功能评价及分区[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 459-472. [Zhu Jinfeng, Zhou Yi, Wang Shixin, et al. Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 459-472.]

[18] 熊善高, 秦昌波, 于雷, 等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 7899-7911. [Xiong Shangao, Qin Changbo, Yu Lei, et al. Methods to identify the boundary of ecological space based on ecosystem service functions and ecological sensitivity: A case study of Nanning City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 7899-7911.]

[19] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258. [Yang Shanshan, Zou Changxin, Shen Weishou, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: A case study of Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 250-258.]

[20] 田柳兰, 王珊珊, 毋兆鹏. 基于多时相遥感数据的乌鲁木齐市生态安全格局构建[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1155-1165. [Tian Liulan, Wang Shanshan, Wu Zhaopeng. Construction of ecological security pattern in Urumqi based on multi-temporal remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1155-1165.]

[21] 刘学, 杨春艳, 高艳妮, 等. 厦门市生态安全格局识别与生态管控区分级管控研究[J/OL]. 生态学报, 2023(13): 1-13. [Liu Xue, Yang Chunyan, Gao Yanni, et al. Identification of ecological security patterns and hierarchical management of ecological control area in Xiamen[J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2023(13): 1-13.]

[22] 李伊彤, 荣丽华, 李文龙, 等. 生态重要性视角下东北林区县域生态安全格局研究——以呼伦贝尔市阿荣旗为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1615-1625. [Li Yitong, Rong Lihua, Li Wenlong, et al. Ecological security pattern at county level in northeast forest area of China from the perspective of ecological importance: A case of Arun Banner in Hulun Buir City[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1615-1625.]

[23] 李洪庆, 杨瑀, 张俊红. 雅鲁藏布江山南宽谷流域生态安全格局构建[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1503-1513. [Li Hongqing, Yang Yu, Zhang Junhong. Construction of ecological security pattern in Shannan Wide Valley Basin of Yarlung Zangbo River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1503-1513.]

[24] 李益敏, 管成文, 郭丽琴, 等. 基于生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 267-276. [Li Yimin, Guan Chengwen, Guo Liqin, et al. Optimization of land use spatial pattern in Jiangchuan District based on ecological sensitivity analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 267-276.]

[25] 程逸楠, 苏光, 秦晓春, 等. 基于景观生态学的旅游公路路域景观现状与生态敏感性研究[J]. 中国园林, 2020, 36(1): 113-117. [Cheng Yinan, Su Guang, Qin Xiaochun, et al. study on landscape status and ecological sensitivity of tourism highway roads based on landscape ecology[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(1): 113-117.]

[26] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 中国生态环境敏感区评价[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1607-1616. [Liu Junhui, Gao Jixi, Ma Su, et al. Evaluation of ecological sensitivity in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(10): 1607-1616.]

[27] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12. [Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 9-12.]

[28] 苏溥雅, 齐实, 梁斌, 等. 西北五省生态敏感性分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(2): 171-179. [Su Puya, Qi Shi, Liang Bin, et al. Analysis of ecological sensitivity of five provinces in northwestern China[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(2): 171-179.]

[29] 王后阵, 蔡广鹏, 郜红娟. 贵州省生态敏感性与社会经济相关性分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(2): 11-16. [Wang Houjian, Cai Guangpeng, Gao Hongjuan. Analysis of ecological sensitivity and socio-economic correlation in Guizhou Province[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2017, 40(2): 11-16.]

[30] 史娜娜, 全占军, 韩煜, 等. 基于生态敏感性评价的乌海市土地资源承载力分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 239-243. [Shi Nana, Quan Zhanjun, Han Yu, et al. Analysis of land resources carrying capacity in Wuhai City based on ecological sensitivity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 239-243.]

[31] 张玉, 马良, 庞海威, 等. 基于水力侵蚀影响因子评价济南市南部山区生态敏感性[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(5): 553-558. [Zhang Yu, Ma Liang, Pang Haiwei, et al. Ecological sensitivity in southern mountain region of Jinan City evaluated on the basis of influencing factors of hydraulic erosion[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology Edition), 2023, 37(5): 553-558.]

[32] 奥勇, 蒋嶺峰, 白召弟, 等. 基于格网GIS的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 164-175. [Ao Yong, Jiang Lingfeng, Bai Zhaodi, et al. Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on Grid-GIS[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 164-175.]

[33] 亚库普·约麦尔, 阿里木江·卡斯木. 喀什市土地利用变化下的生态敏感性研究[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 19-25. [Yuemaier Yakupu, Kasimu Alimujiang. Ecological sensitivity analysis of land use change in Kashgar City[J]. Ecological Science, 2016, 35(2): 19-25.]

[34] 蒲欣冬, 刘兰涛, 陈怀录, 等. 甘肃省广河县土地利用分区研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 64-68. [Pu Xindong, Liu Lantao, Chen Huailu, et al. The zoning of land utilization division in Guanghe, Gansu[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(2): 64-68.]

[35] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13. [Zhang Keli, Peng Wenying, Yang Hongli. Soil erodibility and itd estimation for agriculrural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7-13.]

[36] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996(5): 1-20. [Wang Wanzhong, Jiao Juying. Qutantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996(5): 1-20.]

[37] Zhao Naizhou, Liu Ying, Cao Guofeng, et al. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images[J]. Giscience & Remote Sensing, 2017, 54(3): 407-425.

[38] 许振宇, 贺建林. 湖南省生态经济系统耦合状态分析[J]. 资源科学, 2008, 30(2): 185-191. [Xu Zhengyu, He Jianlin. Analysis of coupling status between ecological system and economic system in Hunan Province[J]. Resource Science, 2008, 30(2): 185-191.]

[39] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220. [Huang Jinchuan, Fang Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment[J]. Geographical Research, 2003, 22(2): 211-220.]

[40] 张传华, 张凤太, 王钟书, 等. 生态敏感区村域尺度土地生态经济系统的耦合协调发展研究——以重庆市江津区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1547-1558. [Zhang Chuanhua, Zhang Fengtai, Wang Zhongshu, et al. Study on the coupling and coordinated development of land eco-economic system in village scale in the ecologically sensitive area: A case of Jiangjin District, Chongqing, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(7): 1547-1558.]

[41] 吴帛阳, 高英杰, 栾春凤. 基于生态敏感性评价的风景名胜区生态保护对策研究——以尧山风景名胜区为例[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 180-188, 199. [Wu Boyang, Gao Yingjie, Luan Chunfeng. Developing ecological protection strategies for scenic spots based on ecological sensitivity[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(2): 180-188, 199.]

[42] 尹海伟, 徐建刚, 陈昌勇, 等. 基于GIS的吴江东部地区生态敏感性分析[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 64-69. [Yin Haiwei, Xu JianGang, Chen Changyong, et al. GIS-based ecological sensitivity analysis in the east of Wujiang City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 64-69.]

[43] 李大龙, 杨井, 李卫红, 等. 基于GIS和USLE的伊犁河谷土壤侵蚀敏感性评价[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 942-951. [Li Dalong, Yang Jing, Li Weihong, et al. Evaluating the sensitivity of soil erosion in the Yili River valley based on GIS and USLE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(4): 942-951.]

[44] 马亚亚, 刘国彬, 张超, 等. 陕北安塞县生态与经济系统耦合协调发展[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6840-6849. [Ma Yaya, Liu Guobin, Zhang Chao, et al. Research on the coordinated development of ecological and economic systems in Ansai County, northern Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6840-6849.]

[45] 毕国华, 杨庆媛, 刘苏. 中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展[J]. 经济地理, 2017, 37(1): 50-58. [Bi Guohua, Yang Qingyuan, Liu Su. Coupling coordination development between ecological civilization constructionand urbanization in China[J]. Economic Geography, 2017, 37(1): 50-58.]

Ecological sensitivity evaluation of the Gansu section of the Yellow River: A case study of Guanghe County

DONG Xiaoyuan, XU Deze, SHI Xiaobin, DU Sen
(School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To explore the protection theory and method applicable to the ecological environment of the Gansu section of the Yellow River Basin and to solve the contradictory problems of ecological environmental protection and socioeconomic development in the region, we selected evaluation factors suitable for the ecological sensitivity of the Gansu section of the Yellow River Basin. We used hierarchical analysis and GIS spatial analysis to quantitatively evaluate the ecological sensitivity of Guanghe County. We also selected six socioeconomic indexes, such as GDP, per capita GDP, and population density, combined with the coupling degree model and the coupling coordination degree model, to explore the ecological sensitivity of Guanghe County and its coupling coordination relationship. This study shows the following: (1) The distance from the water body, soil erodibility, vegetation coverage, and land use types have a strong impact on the ecological sensitivity of Guanghe County. (2) There is a strong spatial correlation and obvious interdependence between the ecological sensitivity subsystem and the social and economic indicator subsystems, with a high coupling degree. (3) In the study of coupling coordination degree, the ecological sensitivity subsystem is in a coordinated development state with the per capita GDP and mineral resource indicator subsystems, whereas it is in an antagonistic development state with the GDP, population density, industrial indicator, and aquaculture indicator subsystems. This study explores the correlation between ecological sensitivity and social and economic development, providing differentiated development and protection coordination paths for this region and offering a reference for similar regions.

Key words: ecological sensitivity; GIS spatial analysis; coupling and coordination; Gansu section of the Yellow River Basin